

温度对冷热原油交替输送影响的数值模拟

曲晶瑀¹ 闫 肃² 张可心³

1. 东北石油大学石油工程学院, 黑龙江 大庆 163318;

2. 中国石油集团海洋工程有限公司, 北京 100176;

3. 中国石油大庆油田有限责任公司储运销售分公司, 黑龙江 大庆 163453

摘 要: 为了解不同原油温度对冷热原油交替输送过程中混油量的影响, 建立冷热原油交替输送计算模型, 运用计算流体动力学 FLUENT 软件采用有限体积法对原油温度进行数值模拟, 得到不同温度条件下冷热原油交替输送过程中的混油分布规律并对模拟结果进行分析。结果表明, 热油前行会比冷油前行产生更多的混油; 在热油前行的情况下, 适当提高冷油出站温度会减少混油量; 在冬季埋地管线地温较低时, 应多进行冷油前行、热油后行的输送方式来减少混油量。

关键词: 顺序输送; 混油; FLUENT; 数值模拟

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2016.04.003

0 前言

原油管道输送方式, 具有运输量大, 能耗少, 运费低的优点。我国原油一般为高黏高凝原油, 此种原油的特点是在低温状态下流动性较差, 这也是我国长输管线大多采用加热输送的原因^[1]。而进口原油与国产原油不同, 大多数为低黏低凝原油, 在低温状态下依然能保持较好的流动性。

随着我国经济的高速发展, 原油进口量也随之剧增。据估计, 到 2020 年我国的原油对外依存度将超过 60%。将不同种类的国产原油和进口原油采取顺序输送的方式逐渐发展起来, 这就是冷热原油交替输送技术^[2-5]。冷热原油交替输送是一个非稳态过程, 在冷热原油顺序输送过程中, 管道内原油温度和压力发生交替变化, 使管道沿线油流的压力、流量和温度均不稳定, 整个管道始终处于非常复杂的水力和热力瞬变状态; 过程包含管道内原油流动与传热耦合、管内油流换热与管外土壤导热耦合的双重耦合问题, 需要建立复杂的数学模型^[6-7]; 在输送过程中会带来如交变温度场、混油、管道疲劳寿命等问题^[8]。针对冷热原油交替输送技术, 结合计算流体动力学 FLUENT 软件建立混油量的计算模型, 用有限

体积法求解, 在不同温度条件下对混油量的影响进行数值模拟。

1 计算模型

1.1 几何建模与网格划分

模拟管道长度 20 m, 直径 1 m, 在建立三维几何模型后通过 ICEM 软件进行 O 型网格划分, 所得六面体网格数 41 152 个, 节点数 5 133 个。管道三维网格见图 1。

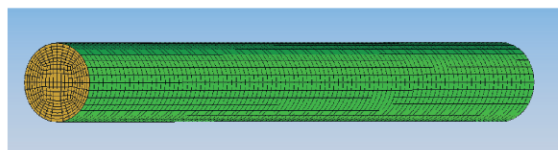


图 1 管道三维网格模型

1.2 计算方程

任何流动问题都必须满足质量守恒定律, 冷热原油交替输送过程中的流体也必须满足质量守恒定律, 即称作连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

收稿日期: 2016-02-20

作者简介: 曲晶瑀(1993-), 男, 黑龙江大庆人, 硕士研究生, 从事油气长距离管输研究。

式中: ρ 为原油密度, kg/m^3 ; u, v, w 为速度在 x, y, z 方向分量, m/s ; t 为时间, s 。

任何流动系统必须满足动量守恒定律, 即牛顿第二定律:

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \mu \nabla \cdot u \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 + \rho f \quad (2)$$

式中: μ 为原油黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; p 为油流压力, Pa 。

能量方程:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho u T) = \text{div} \left(\frac{k}{c_p} \text{grad } T \right) + S_T \quad (3)$$

式中: c_p 为比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; T 为原油温度, $^\circ\text{C}$; k 为原油的传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; S_T 为黏性耗散项。

管道中的原油视为不可压缩流体, 其运动符合湍流运动, 因此采用标准 $k-\varepsilon$ 模型来模拟冷热原油的管内流动。在湍流的工程计算中, 标准 $k-\varepsilon$ 模型应用最广泛, k 和 ε 是两个未知量, 其方程分别是^[9-13]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_K \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \\ & C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_K + G_{3\varepsilon} G_b) - \\ & C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (5)$$

式中: G_k 为由平均速度梯度引起的湍动能 K 的产生项; G_b 为由浮力引起的湍动能 K 的产生项; Y_M 为指可压湍流中脉动扩张的贡献; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 和 $C_{3\varepsilon}$ 为经验常数; S_k 和 S_ε 分别为用户定义的源项。

标准 $k-\varepsilon$ 模型中的经验常数分别为: $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $C_{3\varepsilon} = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

在标准 $k-\varepsilon$ 模型中, ε 表示湍动耗散率, 其定义为:

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_k} \right) \left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_k} \right) \quad (6)$$

式中: u_i' 为时均速度脉动值, m/s 。其中湍动黏度 μ_t 表示成 k 和 ε 的函数, 即:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

式中: C_μ 为经验常数, 取 $C_\mu = 0.09$ 。

1.3 边界条件及物性参数

本模拟管道的进出口分别定义为速度入口和压力出口, 入口速度取 $3 \text{ m}/\text{s}$, 出口压力取 1 个标准大气压。壁面条件选择加强壁面函数条件, 采取一阶迎风差分格式和 SIMPLE 算法求解。

模拟顺序输送的油品为大庆原油(以下简称庆油)和俄罗斯原油(以下简称俄油), 模拟输送时间为 5 s 。庆油与俄油的油品物性参数差异很大, 温度和黏度都随温度的变化而变化, 在冷热原油的交界面会产生热量传递。根据文献^[14-18]查得 2 种油品的密度和黏度随温度的变化曲线, 以此为基础, 计算得到庆油和俄油的密度和黏度随温度变化的函数关系式, 并利用 UDF 编写程序导入 FLUENT 软件进行计算。

$$\rho_Q = 1\,063.911\,6 - 0.693\,2T \quad (8)$$

$$\rho_R = 1\,050.749\,1 - 0.721\,3T \quad (9)$$

$$\mu_Q = \exp(12\,613.116\,8/T - 43.018\,6) \quad (10)$$

$$\mu_R = \exp(2\,506.464\,1/T - 13.385\,3) \quad (11)$$

式中: μ 为原油的动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; T 为热力学温度, K 。

2 计算结果与分析

2.1 不同输送次序对混油的影响

根据庆铁线(大庆—铁岭)生产运行数据, 以不同工况下的数据进行模拟^[19-21]:

1) 冬季庆油出站温度 45°C , 俄油出站温度 15°C 输送;

2) 夏季庆油出站温度 40°C , 俄油出站温度 15°C 输送。

以此分别模拟混油的形成过程。图 2 为冬季和夏季条件下庆油先行和俄油先行产生混油的浓度分布图。

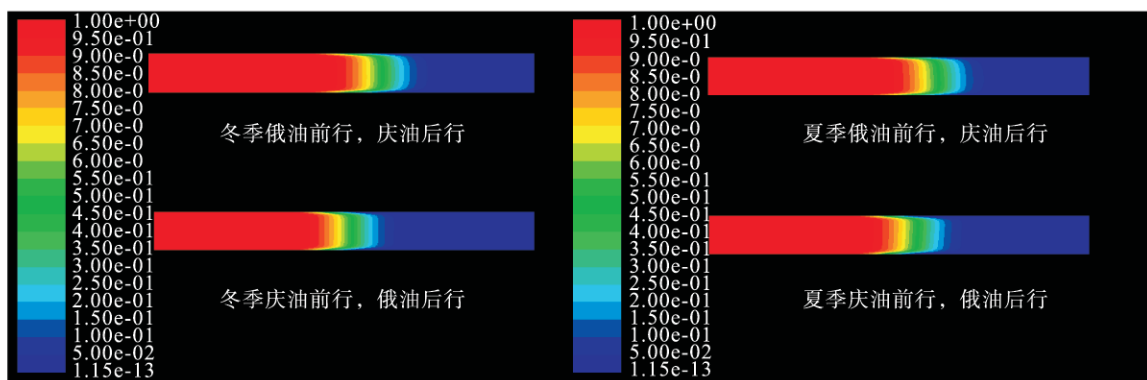
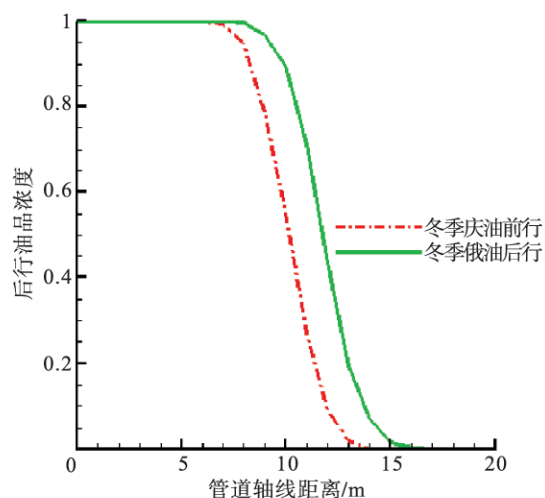
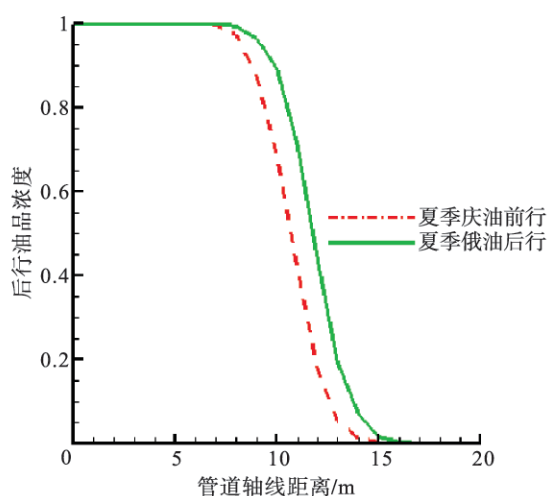


图 2 冬季和夏季不同输送次序混油浓度分布图



a) 冬季不同输送次序混油浓度分布曲线



b) 夏季不同输送次序混油浓度分布曲线

图3 冬季和夏季不同输送次序混油浓度分布曲线

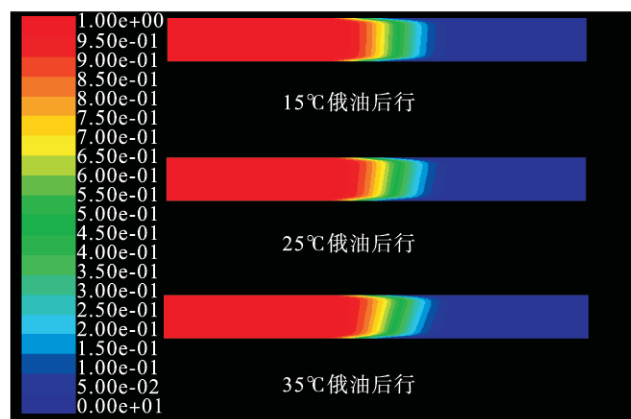
图3为冬季和夏季不同输送次序混油浓度分布曲线,从图3可以看出,无论哪种温度工况下,庆油前行产生的混油量会比俄油前行的情况下多。这主要是因为庆油的黏度即使在较高温度下仍比低温下的俄油要高很多,在庆油前行的过程中,与管壁产生黏性薄层,在后续俄油的不断冲刷过程中产生混油。

2.2 不同冷油出站温度对混油的影响

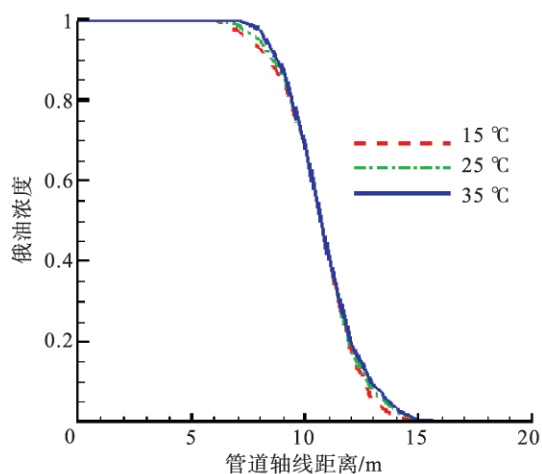
对不同俄油出站温度下(15、25、35℃)和庆油前行产生的混油量进行模拟,得到混油浓度分布图和分布曲线,见图4。从图4可以看出,由于模拟时间较短,三种情况的变化不是特别明显;在热油前行的情况下,后行的俄油温度越高,对管壁附近庆油的冲刷效果越好,混油量会有一定的减小。

从不同冷油出站温度分布曲线可以看出,随着冷油

出站温度的提高,沿管道轴线方向管壁附近混油浓度降低。这是因为提高冷油出站温度,后行冷油与前行热油进行热交换,使冷热原油交界面处温度提高,降低管壁附近的黏性薄层的黏度,提高了冷油冲刷效率,起到了降低混油的作用。



a) 不同冷油出站温度混油浓度分布图



b) 不同冷油出站温度混油浓度分布曲线

图4 不同冷油出站温度混油浓度分布图和分布曲线

2.3 不同埋地管线地温对混油的影响

图5为埋地管线不同地温下(冬季2℃,夏季10℃)混油浓度分布情况,可以看出地温对混油量的影响;由此得到不同情况下的混油分布曲线见图6。由图5~6可知,在冬季埋地管线地温较低时,俄油前行会较庆油前行产生更少的混油量;在夏季输送次序对混油量的影响不是特别明显。

所以冬季埋地管线地温较低时,可以考虑多进行俄油前行,庆油后行的输送方式进行输送;在夏季埋地管线地温较高时,两种输送方式产生的混油量相差很小。

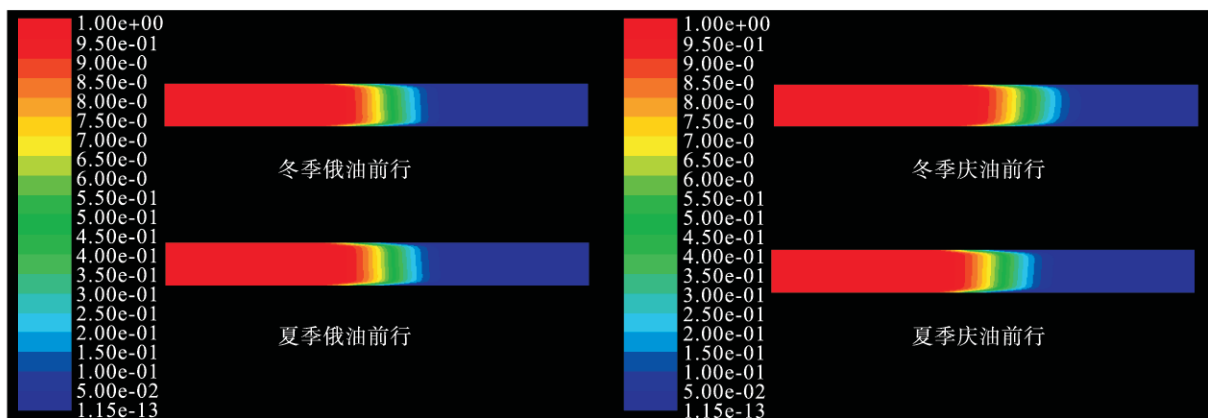
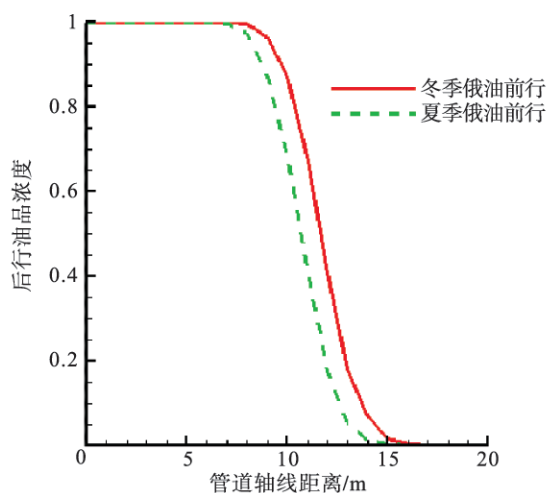
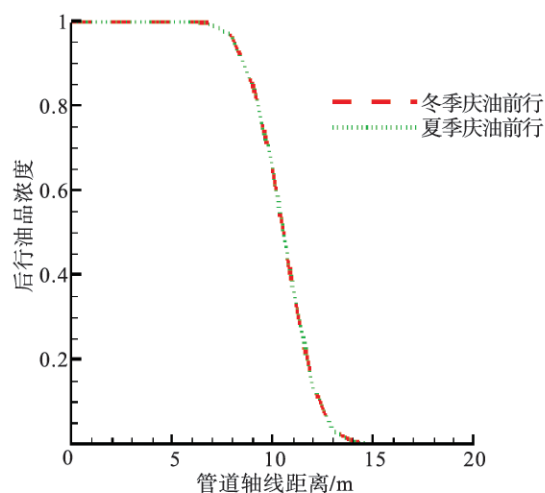


图 5 埋地管线不同地温下混油浓度分布图



a) 2 °C 地温下混油浓度分布曲线



b) 10 °C 地温下混油浓度分布曲线

图 6 埋地管线不同地温下混油浓度分布曲线

3 结论

通过 FLUENT 软件模拟,预测不同温度下冷热原油交替输送产生的混油量,得到:

1) 在出站温度不变的情况下,由于热油的黏度比冷油大,热油前行冷油后行会比冷油前行热油后行产生更

多的混油。

2) 在热油前行的情况下提高冷油的出站温度可以起到减少混油量的作用。但应考虑到加热所需的热力费用与减少混油量之间的最优化选择。

3) 在冬季埋地管线地温较低时,进行冷油前行的输送方式会比热油前行产生更少的混油量;在夏季地温较高时,两种传输方式相差不大。所以在冬季埋地管线地温低时,为了减少混油量可以考虑采用冷油前行,热油后行的输送方式。

参考文献:

- [1] 王 凯,张劲军,宇 波. 冷热原油交替顺序输送中加热时机经济比选[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2008, 32(5): 102-107.
Wang Kai, Zhang Jinjun, Yu Bo. Optimal Heating Ratio of Batch Pipelining of Cold and Hot Crude Oils[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008, 32(5): 102-107.
- [2] 鹿广辉,张冬敏,于 达,等. 冷热原油交替输送的传热过程研究[J]. 油气储运, 2007, 26(4): 14-16.
Lu Guanghui, Zhang Dongmin, Yu Da, et al. Study on the Heat Transfer Process of Alternating Transportation of Cold and Hot Crude Oils[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2007, 26(4): 14-16.
- [3] Bontkes P. Batching Crude Oil and NGL Through a Canadian Trunkline[J]. Pipe Line Industry, 1989, (7): 15-16.
- [4] 徐晓琴,刘 苏,黄 坤,等. 成品油库管输混油头处理技术综述[J]. 天然气与石油, 2009, 27(6): 18-21.
Xu Xiaojin, Liu Su, Huang Kun, et al. Review on Treatment Techniques for Head of Contamination in Product Oil Depot Pipeline[J]. Natural Gas and Oil, 2009, 27(6): 18-21.
- [5] 翁 蕾,王爱萍. 龙贝格积分法在顺序输送管道混油浓度计算中的应用[J]. 天然气与石油, 2010, 28(6): 6-9.

- Weng Lei, Wang Aiping. Application of Romberg Integration Method in Calculating the Contaminated Concentration in Batch Transportation Pipeline [J]. Natural Gas and Oil, 2010, 28 (6): 6-9.
- [6] 周立峰, 吴明. 用高斯积分法计算混油浓度[J]. 天然气与石油, 2005, 23(5): 4-6.
- Zhou Lifeng, Wu Ming. Calculating Contaminated Concentration with Gauss Integral Method [J]. Natural Gas and Oil, 2005, 23 (5): 4-6.
- [7] 王昆, 陈保东, 王占黎, 等. 管道顺序输送中混油及混油量的研究[J]. 管道技术与设备, 2007, (2): 8-9.
- Wang Kun, Chen Baodong, Wang Zhanli, et al. Research on Contamination Caused by Batching Transportation [J]. Pipeline Technique and Equipment, 2007, (2): 8-9.
- [8] 李传宪, 施静. 冷热原油顺序输送过程的热力分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(2): 112-118.
- Li Chuanxian, Shi Jing. Thermal Analysis on Batch Pipelining of Cold and Hot Crude Oil with Different Temperatures [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013, 37 (2): 112-118.
- [9] 杨云鹏, 刘宝玉, 张玉廷, 等. 冷热原油顺序输送温度场波动规律[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2013, 33(1): 53-56.
- Yang Yunpeng, Liu Baoyu, Zhang Yuting, et al. Fluctuation of the Soil Temperature Field of Batching Transportation of Cold and Hot Crude Oils [J]. Journal of Liaoning University of Petroleum & Chemical Technology, 2013, 33 (1): 53-56.
- [10] Anderson J D. Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications [M]. New York: McGraw Hill, 1995: 32-51.
- [11] 王福军. 计算流体动力学分析-CFD 软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- Wang Fjun. Computational Fluid Mechanics Analysis-CFD Software Principle and Application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [12] 李勇, 刘志友, 安亦然. 介绍计算流体力学通用软件—Fluent [J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2001, 16(2): 254-258.
- Li Yong, Liu Zhiyou, An Yiran. A Brief Introduction to FLUENT—A General Purpose CFD Code [J]. Journal of Hydrodynamics, 2001, 16 (2): 254-258.
- [13] Zhang H, Zhuang J. Research, Development and Industrial Application of Heat Pipe Technology in China [J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23 (9): 1067-1083.
- [14] 刘变. 庆铁线中俄原油顺序输送中的热力研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2009.
- Liu Wen. Studies on Transient Heat Transfer in Batch Transportation of Qing-Tie Pipeline [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2009.
- [15] 宋士祥, 吴明, 谢飞, 等. 庆俄原油顺序输送混油优化研究 [J]. 辽宁石油化工大学学报, 2012, 32(3): 63-65.
- Song Shixiang, Wu Ming, Xie Fei, et al. Daqing and Russia Crude Oil Batch Transportation Optimization [J]. Journal of Liaoning Shihua University, 2012, 32 (3): 63-65.
- [16] 吴明, 周诗崇, 王雷, 等. 冷热原油交替顺序输送优化模型研究 [J]. 石油化工高等学校学报, 2012, 25(5): 64-67.
- Wu Ming, Zhou Shidong, Wang Lei, et al. Optimization Model Research in Process of Batch Transportation of Cool and Hot Crude Oil [J]. Journal of Petrochemical Universities, 2012, 25 (5): 64-67.
- [17] 陆争光. 我国油气管道输送相关技术进展及展望 [J]. 当代化工, 2015, (7): 1544-1547.
- Lu Zhengguang. Progress and Prospect of the Oil and Gas Pipeline Engineering Relevant Technology in China [J]. Contemporary Chemical Industry, 2015, (7): 1544-1547.
- [18] 赵海燕. 顺序输送混油的 CFD 模拟 [D]. 大庆: 大庆石油学院, 2010.
- Zhao Haiyan. CFD Simulation of Contamination on Batch Transportation Pipeline [D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2010.
- [19] 赵会军. 成品油管道顺序输送特性研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2011.
- Zhao Huijun. Study on the Characteristics of Batch Transportation of Multi-product Pipeline [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2011.
- [20] 徐嘉爽. 庆铁新线工艺运行方案优化研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2011.
- Xu Jiashuang. Operation Optimization of Daqing-Tieling New Oil Pipeline [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2011.
- [21] 李云超. 庆铁线输送俄油方案研究 [D]. 大庆: 大庆石油学院, 2008.
- Li Yunchao. Study on Transport Projects of Russian Oil of Daqing-Tieling Oil Pipelines [D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2008.